

強磁性/反強磁性エピタキシャル積層膜の作製とその交換磁気異方性に関する研究

著者	甲野藤 真
号	2621
発行年	2000
URL	http://hdl.handle.net/10097/7894

このとう まこと	
氏 名	甲野藤 真
授 与 学 位	博士(工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	強磁性／反強磁性エピタキシャル積層膜の作製とその交換磁気異方性に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 高橋 研
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 高橋 研 東北大学教授 荒井 賢一
	東北大学教授 大野 英男 東北大学助教授 角田 匡清

論文内容要旨

第 1 章 序論

強磁性／反強磁性積層膜の交換磁気異方性は、高記録密度磁気ディスク装置に搭載されるスピナルブヘッドに応用されている。記録密度の向上に伴い、極薄の反強磁性層で大きな交換磁気異方性を任意方向に誘導する技術が必要となっているが、その開発指針は十分に確立されているとはいえない。その原因は、交換磁気異方性の発現機構の詳細が未だ明確化されていないことにある。

例えば、交換磁気異方性が発現するための反強磁性層の必要膜厚は、反強磁性材料の磁気異方性の大きさに関係すると予想されているが、異方性エネルギーの評価が困難なため、両者の相関は明らかにされていない。さらに、反強磁性層の磁気異方性は交換磁気異方性の誘導方向を決定するとされるが、磁気異方性の物理的起源は未だ解明されておらず、磁界中冷却時の印加磁界の方向に交換磁気異方性が誘導されるという経験的事実から、その起源が誘導磁気異方性にあるとも考えられているが、詳細は全く不明である。また、交換磁気異方性の大きさは、積層界面での強磁性スピンと反強磁性スピンの交換結合のエネルギーによって決定されると考えられているが、界面の結合エネルギーと反強磁性スピンの配列状態との相関は明確化されていない。

このような背景を踏まえて、本研究の目的を、反強磁性薄膜の磁気異方性の評価方法の確立、磁気異方性の物理的起源の解明と実用反強磁性材料の磁気異方性エネルギーの決定、ならびに、強磁性／反強磁性積層界面における反強磁性材料のスピンの配列と界面の結合エネルギーとの相関の明確化とした。さらに、得られた知見をもとにして、高記録密度対応スピナルブヘッドの開発指針を提言する。

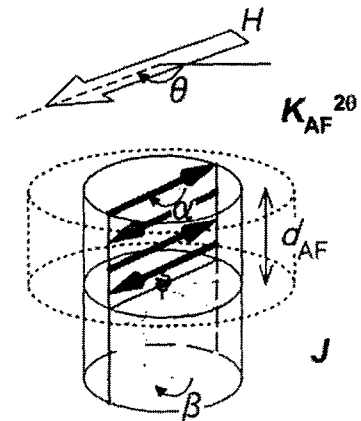
第 2 章 実験方法

本章では、本研究で用いた $\text{Ni-Fe}/\text{Mn}_{1-x}\text{Ni}_x$ ($x = 0.18, 0.23$) および $\text{Cu}/\text{Mn-Ir}/\text{Co-Fe}$ 積層膜の作製方法、構造解析法と磁気特性の測定方法、および、理論解析に用いるモデルに関して記述している。Fig.1 にはモデルの概念図を示したが、それぞれ単磁区状態にある強磁性スピンと反強磁性スピンの、積層界

面で単位面積当たりの結合エネルギー J で結合しており、反強磁性層には面内でそれぞれ2、4、6回の対称性を有する単位体積当たりの磁気異方性エネルギー K_{AF}^{20} 、 K_{AF}^{40} 、 K_{AF}^{60} が仮定されているものである。

第3章 MgO 単結晶基板上への強磁性／反強磁性エピタキシャル積層膜の作製と構造評価

室温のMgO単結晶基板上に、積層膜の1層目をバイアスパッタリング法で堆積し、2層目以降を通常のスパッタリング法で積層する手法により、Ni-Fe/Mn-Ni および Cu/Mn-Ir/Co-Fe 積層膜のエピタキシャル成長



に成功し、MgO(110)、(001)、(111)基板を用いることによって、それぞれ(110)、(001)、(111)面に配向し、膜面内の結晶方位が揃った積層

Fig.1 モデルの概念図(K_{AF}^{20} を仮定)

膜が作製できることを明らかにした。さらに、反強磁性層の結晶構造について詳細な解析を行い、バルクの反強磁性材料に関する結晶構造とスピン構造の対応関係に基づいて、積層界面での反強磁性スピンの配列状態を推定した。

第4章 強磁性／反強磁性エピタキシャル積層膜の反強磁性層の磁気異方性

本章では、強磁性／反強磁性エピタキシャル積層膜の磁気トルクの解析から、反強磁性層の磁気異方性を評価する方法を確立することによって、反強磁性層の磁気異方性の起源の解明と、異方性エネルギーの定量評価を行っている。

モデルによる計算結果から、反強磁性層厚 d_{AF} が交換磁気異方性の発現に必要な反強磁性層の臨界膜厚 d_{AF}^{cr} よりも小さい積層膜の磁気トルク曲線には、反強磁性層の磁気異方性が反映されると予想されることから、 $d_{AF} < d_{AF}^{cr}$ の状態にある積層膜の磁気トルクを測定した。Fig. 2 には、MgO(110)/Ni-Fe 200 Å/Mn_{0.82}Ni_{0.18} 50 Å積層膜の磁気トルク曲線の測定結果(左)と対応する計算結果(右)を示した。両者とも低磁界では1回対称の成分、高磁界では反強磁性層の一軸磁気異方性を反映した2回

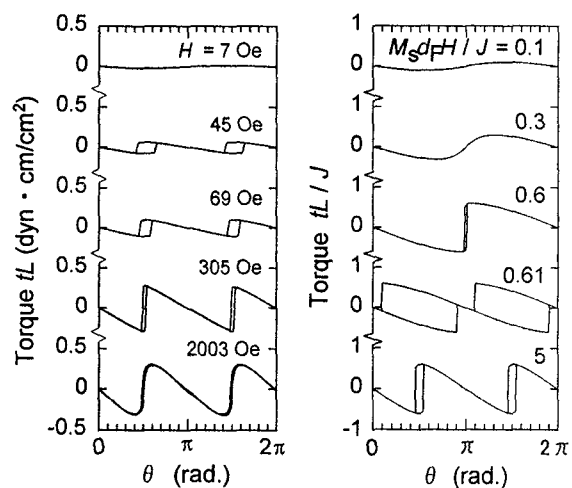


Fig. 2 MgO(110) / Ni-Fe 200 Å / Mn_{0.82}Ni_{0.18} 50 Å積層膜の磁気トルク曲線の測定結果(左)とモデルによる計算結果(右)

対称の成分がそれぞれ支配的なトルク曲線となっており、積層膜のトルク曲線がモデルによってよく説明できることが実証された。異方性の容易軸方向はMn-Ni[110]軸に平行であり、Mn-Niの結晶学的な対称性を強く反映

している。(001)および(111)面配向したNi-Fe/Mn-Ni積層膜および(110)面配向したMn-Ir/Co-Fe積層膜の場合でも同様の結果が得られたことから、反強磁性層の磁気異方性の物理的起源は主として結晶磁気異方性であると結論した。

さらに、モデルによる理論解析によって、磁気トルク曲線の印加磁界に対する飽和振幅と反強磁性層の磁気異方性エネルギーとの間に成立する関係式を導出し、飽和振幅の測定結果から実用反強磁性材料の磁気異方性エネルギーを、例えば(110)面配向した $\text{Mn}_{0.82}\text{Ni}_{0.18}$ について $3 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ 、 $\text{Mn}_{0.74}\text{Ir}_{0.26}$ について $2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ と初めて決定した。

Ni-Fe/Mn-Ni 積層膜の磁気異方性の解析結果を Fig.3 に要約した。

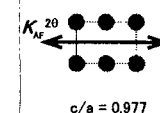
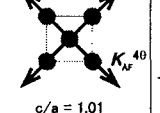
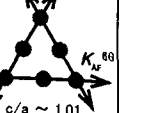
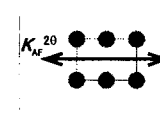
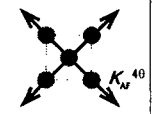
	(110) 配向	(001) 配向	(111) 配向
18at% Ni-Mn	 K_{AF}^{20} $c/a = 0.977$	 K_{AF}^{40} $c/a = 1.01$	 K_{AF}^{60} $c/a \sim 1.01$
	$3.2 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$	$1.4 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$	$7.4 \times 10^3 \text{ erg/cm}^3$
23at% Ni-Mn	 K_{AF}^{20} $c/a = 0.985$	 K_{AF}^{40} $c/a \sim 1$	—
	$2.0 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$	$9.5 \times 10^3 \text{ erg/cm}^3$	—

Fig.3 磁気トルク法で評価した Ni-Fe/Mn-Ni 積層膜の磁気異方性。矢印は異方性の容易方向を示す。下段の数値は反強磁性薄膜の磁気異方性エネルギー。

第5章 結晶配向面の異なる強磁性／反強磁性エピタキシャル積層膜の交換磁気異方性

本章では、配向面や反強磁性材料の異なる強磁性／反強磁性エピタキシャル積層膜の交換磁気異方性を比較することにより、反強磁性層の磁気異方性ならびにスピン構造と交換磁気異方性との関係について検討している。

まず、 K_{AF} と d_{AF}^{cr} の相関について検討するために、 $2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ という大きな K_{AF} が得られた Mn-Ir/Co-Fe 積層膜と Ni-Fe/Mn-Ni 積層膜の d_{AF}^{cr} を比較した。その結果、 d_{AF}^{cr} は、Mn-Ir を用いた積層膜では 36 Åであったのに対し、(110)面配向した Ni-Fe/Mn_{0.82}Ni_{0.18} 積層膜 ($K_{AF} = 3 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$) では 108 Åと非常に大きく、反強磁性材料の磁気異方性の増大により、 d_{AF}^{cr} が減少することが明らかになった。

Fig. 4 には、本研究で決定した K_{AF} と d_{AF}^{cr} の値を用いて、理論解析の結果に基づき、積層界面の結合エネルギー J を算出した結果を示す。例えば、配向面の異なる Ni-Fe/Mn_{0.82}Ni_{0.18} 積層膜の場合、(110)面配向では 0.69 erg/cm^2 、(001)および(111)面配向ではおよそ 0.03 erg/cm^2 となり、(110)面配向した積層膜の J が他の場合に比較して1桁以上大きいことがわかった。(110)面配向した他の積層膜でも J の値が大きいことがわかる。積層界面での反強磁性スピンの配列状態は、(110)

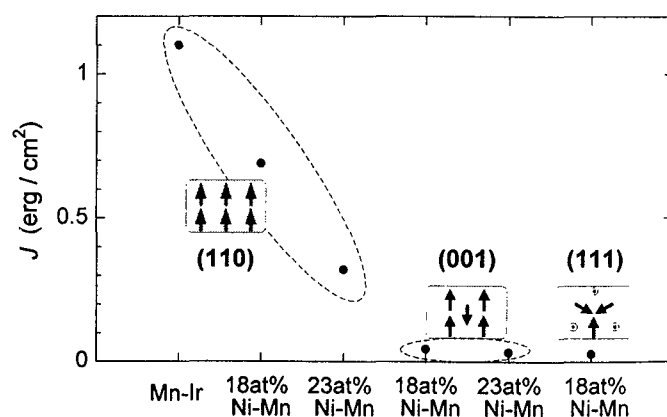


Fig. 4 反強磁性層の磁気異方性エネルギー K_{AF} と臨界膜厚 d_{AF}^{cr} から算出した界面の結合エネルギー J

面配向した積層膜の場合、いずれも面内で強磁性的な配列であり、(001)および(111)面配向した積層膜では、スピンの面内成分が相殺するような配列であると第3章において推定されていることから、積層界面における反強磁性スピンの面内成分が相殺しない場合に大きな交換磁気異方性を導出し得ることが明らかとなった。

次に、反強磁性結晶粒の膜面内の結晶方位が揃ったエピタキシャル積層膜を用いて、磁界中冷却時の

印加磁界の方向と、交換磁気異方性の誘導方向との相関について検討した。その結果、交換磁気異方性の誘導方向は、印加磁界の方向とは無関係に、結晶磁気異方性を起源とする反強磁性層の磁気異方性によって決定されることが明らかにされた。このことから、交換磁気異方性が任意の印加磁界の方向に誘導されるには、一般に用いられる反強磁性結晶粒の面内方位がランダムな多結晶積層膜のように、反強磁性結晶粒の磁気異方性の容易軸が面内等方に分布することが必要であるとわかった。

第6章 極薄反強磁性層で大きな交換磁気異方性を導出するための指針

本章では、本研究で得られた知見をもとに、高記録密度対応スピナルバルブヘッドの開発に必須な、極薄の反強磁性層厚で大きな交換磁気異方性を導出するための技術指針を提言した。

まず、極薄の反強磁性層で交換磁気異方性を安定導出する方法として、大きな磁気異方性を有する反強磁性材料を選定し、反強磁性層の臨界膜厚を低減させることを提案した。

また、大きな交換磁気異方性を誘導するための指針としては、スピンの強磁性的に配列した結晶面を有する反強磁性材料を用い、積層膜の配向面の制御によって、界面内での反強磁性層のスピン配列が強磁性的である積層膜を作製し、強磁性スピンと反強磁性スピンの結合エネルギーを増大させることを提言した。

第7章 結論

本章では本研究で得られた結論を総括している。

強磁性／反強磁性エピタキシャル積層膜の磁気トルクの解析から、反強磁性層の磁気異方性を評価する新規な方法を確立し、反強磁性層の磁気異方性の起源が結晶磁気異方性であることを明確にした。さらに、実用反強磁性材料の磁気異方性エネルギーを初めて決定し、反強磁性層の臨界膜厚が反強磁性材料の磁気異方性の増大によって減少することを実証した。また、反強磁性層のスピン配列と積層界面の結合エネルギーとの相関について検討し、反強磁性スピンの積層界面内で強磁性的な配列をしている場合に、界面の結合エネルギーが増大することを明らかにした。以上の知見をもとに、極薄の反強磁性層で大きな交換磁気異方性を安定導出するための指針として、磁気異方性の大きな反強磁性材料を選定し、界面内での反強磁性層のスピン配列が強磁性的であるような積層膜を作製することを提言した。

論文審査結果の要旨

強磁性薄膜と反強磁性薄膜との積層膜において観測される交換磁気異方性は、高記録密度磁気ディスク装置に搭載されるスピバルブヘッドに応用されているが、その発現機構の詳細は未だ明確にされていない。著者は反強磁性薄膜の磁気異方性の新規な評価方法を確立し、積層膜の交換磁気異方性と反強磁性材料の磁気異方性エネルギーとの相関を明確化した。また、強磁性層／反強磁性層積層界面における反強磁性材料のspin構造との相関についても合わせて検討を行い、大きな交換磁気異方性を導出するために必要な反強磁性spinの配列状態を決定した。本論文はこの研究成果についてまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、本研究で用いた積層膜の成膜方法、構造解析、磁気測定法、理論解析に用いるモデルに関して記述している。

第3章では、MgO単結晶基板を用い、スパッタリング法によって膜面内に結晶方位の揃った{110}、{001}、{111}配向の強磁性層／反強磁性層エピタキシャル積層膜を作製することに成功している。また、これらの積層膜の詳細な構造解析を行った結果について述べており、薄膜工学上有用な知見を得ている。

第4章では、各エピタキシャル積層膜の磁気トルクの印加磁界依存性の解析から反強磁性層の磁気異方性を評価する方法を確立している。反強磁性層の磁気異方性の起源が結晶磁気異方性であることを明らかにすると共に、実用反強磁性材料の磁気異方性エネルギーを、例えば{110}面配向した $\text{Mn}_{82}\text{Ni}_{18}$ について $K_{\text{AF}} = 3 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ と世界に先駆けて決定した。これは、新材料開発の上で極めて有用な成果である。

第5章では、反強磁性材料の磁気異方性ならびにspin構造と積層膜の交換磁気異方性との相関について述べている。反強磁性層の磁気異方性の増大により、交換磁気異方性が発現するための必要膜厚が低減されること、ならびに積層界面における反強磁性層のspinの面内成分が相殺しない場合に大きな交換磁気異方性が導出できることを明らかにしている。

第6章では、極薄の反強磁性層厚で大きな交換磁気異方性を導出するための指針として、反強磁性材料の磁気異方性エネルギーが大きく、積層界面での反強磁性層のspin配列が強磁性的である積層膜の作製を提言している。これは高記録密度対応のスピバルブヘッドの開発指針を与える重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、スピバルブヘッドに不可欠な強磁性層／反強磁性層積層膜の交換磁気異方性と、反強磁性材料の磁気異方性およびspin構造との相関を明確化し、その設計指導原理を確立したものであり、磁気記録工学ならびに電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。